

Opinnäytetyö  
Elektroniikka  
Elektroniikkasuunnittelu  
2011

Mika Marjunen

# MONILÄHTÖISEN TEHOLÄHTEEN VALVONTA JA SUOJAUS



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mika Marjunen

## MONILÄHTÖISEN TEHOLÄHTEEN VALVONTA JA SUOJAUS

Tämän työn tarkoituksena oli suunnitella n. 200 W:n teholle monilähtöinen DC/DC-teholähde, joka muuttaa akuston jännitteen useiksi lähtöjännitteiksi. Työssä painotettiin erityisesti teholähteen valvontaa ja suojausta. Tavoitteena oli, että laite tulee korvaamaan asiakasyrityksen vanhan teholähteen. Suunnittelun pohjana käytettiin vanhan laitteen spesifikaation lisäksi rautatiestandardia EN50155. Laitteen suunnittelussa pyrittiin alusta asti huomioimaan sähkömagneettiset häiriöt ja vaativan käyttöympäristön asettamat vaatimukset.

Laite suunniteltiin diskreettejen komponenttejen sijaan hyödyntäen valmiita DC/DC-moduuleja, joilla on hyvä hyötysuhde. Sähkömagneettinen yhteensopivuus huomioitiin suunnittelemalla laitteen tulo- ja lähtöpuolelle suodatuksia ja panostamalla piirilevy-suunnitteluun. EMC-suunnittelun onnistuminen varmistettiin Turun AMK:n EMC-laboratoriossa tehdyin mittauksin. Laitteeseen jokaiselle lähdölle suunniteltiin yli- ja alijännitesuojaukset sekä ylivirtasuojaus, jotka sammuttavat teholähteen lähdön mahdollisessa vikatilanteessa laitteiden rikkoontumisen estämiseksi.

Suunnittelun onnistuminen varmistettiin testaamalla valmistettu prototyyppi laboratoriolosuhteissa. Suojausten lisäksi testattiin laitteen kuormituksen kesto ja lähtöjen pysyminen asetettujen toleranssien sisällä. Testattu prototyyppi pysyi annettujen toleranssien sisällä ja alitti standardin EN50155 määrittämät häiriösaateilyrajat.

ASIASANAT:

DC/DC-moduuli, EN50155, EMC, teholähteet

Mika Marjunen

## MONITORING AND PROTECTION OF A POWER SUPPLY WITH SEVERAL OUTPUTS

In this paper a design of a power supply unit with several outputs and output power of 200 watts is presented. The power supply converts accumulator voltage into several output voltages. Monitoring and protection of the power supply are emphasized. Power supply unit was to replace the customer's old device. The designing process was based on standard EN50155 and partly the specification of the old device. From the very beginning electromagnetic compatibility and requirements of the environment were taken into account in the design process.

Instead of using discrete components the power supply unit was built using DC/DC modules with a good operating efficiency. A printed circuit board was carefully designed and filtering for inputs and outputs of the DC/DC modules were designed in order to enhance electromagnetic compatibility. EMC testing was carried out in the EMC laboratory of Turku University of Applied Sciences. Over and under voltage protections were designed for all outputs. In addition, over current protection was designed. These protections would shut down the power supply unit in an event of failure to prevent any damage for the equipment in use.

The success of the design was verified by comprehensive testing of a prototype device. In addition to the testing of protection circuits also temperature and load testing were accomplished. The tested prototype device passed all the tests that were carried out.

### KEYWORDS:

DC/DC module, EN50155, EMC, power supply

# SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2 SUUNNITTELUN VAATIMUKSET</b>	<b>2</b>
2.1 Tulojännitealue	2
2.2 Lähtöjännitteet	3
2.3 Valvonta ja suojaus	3
2.4 Käyttöympäristön vaatimukset	4
<b>3 SÄHKÖMAGNEETTISET HÄIRIÖT</b>	<b>5</b>
3.1 Johtuvat Häiriöt	6
3.2 Säteilevät häiriöt	8
<b>4 EMC SUUNNITTELU</b>	<b>9</b>
4.1 Komponentit	9
4.1.1 Kondensaattorit	9
4.1.2 Komponenttien sijoittelu	10
4.2 Suodattimet	10
4.3 Piirilevy ja kotelo	11
<b>5 TEHOLÄHTEEN RAKENNE</b>	<b>13</b>
5.1 Lähtöjen valvonta ja suojaus	13
5.2 Apujännitepiiri	15
5.3 Polariteettisuojaus	16
5.4 Transienttisuojaus	17
5.5 Suodatus	18
5.5.1 Tulon suodatus	18
5.5.2 Lähdön suodatus	19
5.6 Piirilevyt	20
<b>6 LUOTETTAVUUDEN PARANTAMINEN JA TESTAUS</b>	<b>22</b>
6.1 Moduulien rinnankytkentä	22
6.2 Lämpötilatesti	24

6.3 Tyypitesti	24
6.4 EMC testaus	26
<b>7 LAITTEEN KEHITTÄMINEN JA PARANNUSEHDOTUKSET RAKENTEESEEN</b>	<b>27</b>
<b>8 YHTEENVETO</b>	<b>28</b>
<b>9 LÄHTEET</b>	<b>29</b>

## KÄYTETYT LYHENTEET JA SYMBOLIT

$C$	Kapasitanssi
$I$	Virta
$I_{\text{nom}}$	Nimellisvirta
$P$	Teho
$U$	Jännite
$\eta$	Hyötysuhde
DC	Tasavirta (Direct Current)
ESL	Loisinduktanssi (Equivalent Series Inductance)
ESR	Loisresistanssi (Equivalent Series Resistance)
EMI	Sähkömagneettinen häiriö (Electromagnetic Interference)
EMC	Sähkömagneettinen yhteensopivuus (Electromagnetic Compatibility)
MOSFET	Metallioksidikanavatransistori (Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)
SRF	Ominaisresonanssitaajuus (Self Resonant Frequency)
TVS	Transienttisuojadiodi (Transient Voltage Suppressor)

# 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on suunnitella monilähtöinen DC/DC-teholähde n. 200 W:n lähtöteholle. Opinnäytetyössä painotetaan laitteen valvontaa ja suojausta. Laite tulee korvaamaan asiakasyrityksen vanhan teholähteen. Laitteen suunnittelussa pyritään alusta asti huomioimaan vaativan käyttöympäristön asettamat vaatimukset sekä sähkömagneettinen yhteensopivuus.

Teholähde toteutetaan hakkuritekniikalla hyödyntäen valmiita DC/DC-moduuleita, joilla on hyvä hyötysuhde. Laite suojataan yli- ja alijännitteiden sekä ylivirran varalle. Lisäksi laite suojataan standardin EN50155 määrittelemiä transienteja vastaan. Tarkoituksena oli suunnitella vianmääritystä helpottamaan värilliset ledit, jotka kertovat kunkin lähdön tilan.

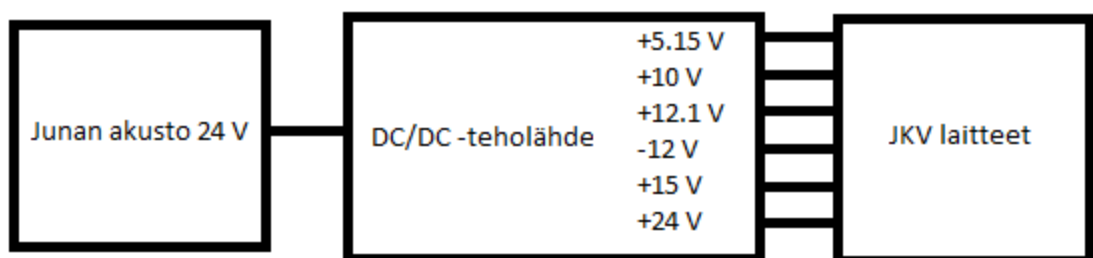
EMC huomioitiin suunnittelemalla laitteen tulo- ja lähtöpuolelle suodatukset ja panostamalla huolelliseen piirilevysuunnitteluun. Jännitesuojaukset toteutettiin mittaamalla lähtöjännitteitä komparaattorikytkennällä, joka sammuttaa DC/DC-moduulin tarvittaessa optoerottimen välityksellä. Lähdön antamaa virtaa mitattiin virramittausvastuksella. Vastuksen yli olevan jännitteen kasvaessa liian suureksi lähtö sammutettiin. Asiakkaalla oli ollut eniten ongelmia yksittäisessä lähdössä. Laitteen luotettavuutta pyrittiin parantamaan kytkemällä kyseiseen lähtöön kaksi moduulia rinnan, jolloin lähtö pysyy jännitteisenä, vaikka toinen moduuleista vikaantuisikin. Rinnankytkentä toteutettiin perinteiden tehodiodikytkennän sijasta ideaalidiodipiirillä häviöiden pienentämiseksi.

Suunnittelun onnistuminen varmistettiin kattavin laboratoriotestein: EMC-mittaukset suoritettiin Turun AMK:n EMC-laboratoriossa, minkä lisäksi testattiin laitteen kuormitettavuus, suojausten toiminta ja lähtöjen pysyminen asetettujen toleranssien sisällä.

## 2 SUUNNITTELUN VAATIMUKSET

Suunnittelun perustana käytettiin pääasiassa rautatiestandardia EN50155 ja joiltakin osin korvattavan teholähteen spesifikaatioita. EN50155 on kiskokalustoon tarkoitettuja elektronisia laitteita koskeva standardi, jossa määritellään mm. laitteiden ympäristövaatimukset (lämpötila-alue, värinän kesto, ilmankosteus yms.) ja laitteen elektroniikkasuunnitteluun liittyvät seikat (jännitealueet, sähkömagneettinen yhteensopivuus, isolointi yms.).

Suunniteltava laite muuntaa junan akuston jännitteen sopiviksi jännitteiksi junan kulunvalvontaa suorittaville laitteille. Kuvassa 2.1 on havainnoillistettu teholähteen sijoituspaikka. Teholähde sijoitetaan samanlaiseen koteloon kuin vanhakin laite.



**Kuva 2.1** Teholähteen sijoitus.

### 2.1 Tulojännitealue

Teholähde saa käyttöjännitteensä junan akuilta ja sen nimellinen tulojännite ( $U_{nom}$ ) on 24 V. Standardin EN50155 mukaan laitteen tulee toimia seuraavalla tulojännitealueella ilman häiriöitä  $U_{min} = 0,6 \times U_{nom}$  ja  $U_{max} = 1,4 \times U_{nom}$ . Teholähteen käyttöjännitealueeksi määriteltiin hieman laajempi alue kuin mitä standardi edellyttäisi. Tulojännitealue laitteelle on  $U_{min} = 14 \text{ V}$  ja  $U_{max} = 48 \text{ V}$ .

Standardin mukaan laitteen tulee kestää ilman toiminnan häiriöitä  $3,5 \times U_{nom}$  ylijännitepiikki 20 ms:n ajan. Lisäksi laitteen tulee kestää amplitudiltaan 1,8 kV ja kestoltaan 1,2/50  $\mu\text{s}$  transientti, jossa 1,2  $\mu\text{s}$  on pulssin nousuaika ja 50  $\mu\text{s}$  aika, jossa pulssin amplitudi puolittuu huippuarvosta. Transientti on määritelty tarkemmin luvussa 3.1.



## 2.2 Lähtöjännitteet

Teholähteessä on 6 lähtöä, jotka on listattu taulukossa 2.1. Taulukosta nähdään nimellisten lähtöjännitteiden lisäksi nimellis- ja maksimivirrat kullekin lähdölle. Asiakkaalla oli ollut eniten ongelmia 12,1 V:n lähdön kanssa, joten se päätettiin toteuttaa kahden moduulin rinnankytkennällä luotettavuuden parantamiseksi. Kyseistä rinnankytkentää tarkastellaan tarkemmin luvussa 6. Lähtöjännitteiden toleransseiksi valittiin 3% kuten vanhassakin laitteessa.

**Taulukko 2.1** teholähteen lähtöjen jännite- ja virta-arvot.

$U_{\text{nom}} / \text{V}$	$I_{\text{nom}} / \text{A}$	$I_{\text{max}} / \text{A}$
5,15	2,5	5
10,25	3	4
12,1	5,6	7
-12	0,25	2
15	0,4	2
24	1	2

## 2.3 Valvonta ja suojaus

Koska teholähde syöttää junan kulunvalvontaa suorittavia herkkiä laitteita, on tärkeää, että lähtöjen jännitteet ja virrat pysyvät määritellyissä rajoissa. Asiakkaan testeissä huomattiin, että jo 5 %:n lasku 12,1 V:n lähdössä laskee teholähteen syöttämän radiolähtetimen tehoa neljänneksellä [1].

Häiriötilanteita varten teholähteen lähtöön suunniteltiin yli- ja alijännitesuojat sekä ylivirtasuoja. Vanhassa laitteessa oli testiliittimet lähtöjännitteiden tarkistamista varten ja vastaavat testiliittimet sijoitettiin myös uuteen laitteeseen. Tämän lisäksi suunniteltiin

jännitevalvontaa varten kytkentä, joka ilmoittaa ledien avulla, onko jännite toleranssin sisällä vai onko lähdössä yli- tai alijännite, jolloin vianmääritys on mahdollisessa vikatilanteessa nopeampaa. Aihetta käsitellään tarkemmin luvussa 5.

Teholähteen eristelujuudet määräytyvät standardin EN60950 mukaan seuraavasti:

- tulon ja lähdön välillä: 2200 V
- tulon ja kotelon välillä: 500 V
- lähdön ja kotelon välillä 500 V

Teholähteessä käytettävien DC/DC-moduulien eristelujuus on 2250 V, joka on riittävä arvo tulon ja lähdön välille. Komponenttien valinnassa tulee huomioida takaisinkytkentäkomponenttien ja mahdollisesti koteloon kytkettävien komponenttien eristevahvuudet.

## **2.4 Käyttöympäristön vaatimukset**

Teholähteen tulee toimia laajalla lämpötila-alueella, joka vaikuttaa omalta osaltaan komponenttien valintaan. Komponenttien arvojen muutokset lämpötilan suhteen tulee huomioida suunnittelussa, tämän lisäksi pitää huomioida mahdollisten lämpötilamuutosten vaikutukset laitteen toleransseihin (esim. lähtöjännitteiden toleranssit). Laitteen lämpötila-alue on EN50155-standardin T2-alue eli  $-40 \dots +70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Standardin mukaan tunneleiden läpi ajamisesta aiheutuvat lämpötilan muutokset tulisi myös huomioida. Lämpötilan muutosnopeuden oletetaan tällöin oleva  $3 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$  ja maksimuutoksen  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . [2]

Teholähde sijoitetaan samaan paikkaan kuin vanhakin laite. Tällöin laitteen kotelon mitat ovat samat kuin vanhassakin laitteessa (300 mm x 265 mm x 100 mm). Kotelon kotelointiluokka on IP00. Laitteen jäähdytys tapahtuu johtumalla alumiiniprofiiliin ja kotelon kautta.

Teholähteen tulee kestää keskimääräinen vuotuinen suhteellinen maksimissaan 75 % ilmakeuhuus. Lisäksi 30 peräkkäisenä päivänä 95 % suhteellinen keuhuus. [2]

### 3 SÄHKÖMAGNEETTISET HÄIRIÖT

Hakkuriteholähteet ovat toimintatavastaan johtuen luontaisia sähkömagneettisten häiriöiden lähteitä. Korkeista kytkentätaajuuksista johtuvat nopeat jännitteiden ja virtojen muutokset aiheuttavat harmonisia häiriökomponentteja, jotka häiritsevät helposti tehonlähteen ympäristössä olevia elektronisia laitteita. Sähkömagneettinen häiriö (Electromagnetic Interference, EMI) voidaan määritellä seuraavasti: Elektronisen laitteen vaikuttaminen toisen laitteen toimintaan sähkömagneettisen energian välityksellä. Sähkömagneettisen häiriön voidaan ajatella koostuvan kolmesta osasta: Lähteestä, kytketymisestä ja vastaanottajasta. Yhden osan poistaminen poistaa myös sähkömagneettisen häiriön. Vaikka esim. koteloiminen saattaa poistaa kytketymistien tai suojata vastaanottavan piirin ja näin ollen ratkaista ongelman, on yleensä parempi tapa pyrkiä poistamaan ongelma sen syntypaikassa. Tämä estää häiriön mahdollisen kytketymisen laitteen muihin osiin, joissa se voisi mahdollisesti vahvistua ja edetä ympäristöön. [3]

Sähkömagneettinen yhteensopivuus (Electromagnetic Compatibility, EMC) voidaan puolestaan määritellä sähkömagneettisten häiriöiden puuttumiseksi, jolloin laite ei häiritse muita laitteita eikä ole herkkä muiden laitteiden aiheuttamille häiriöille toimintaympäristössään. Vaikka tehonlähteen aiheuttamat sähkömagneettiset häiriöt mitataan tavallisesti yksittäisestä laitteesta, koskevat EMC -vaatimukset koko järjestelmää eivätkä pelkästään tehonlähdettä, joka on vain yksi järjestelmän osa. [3]

Sähkömagneettisia piikkejä syntyy mm. salamoinnista ja suurten induktiivisten kuormien kytkemisestä. Salamot tuottavat yhteismuotoisia pulsseja jännitelinjan ja maatason välille, kun taas laitteisto itsessään aiheuttaa differentiaalisia häiriöitä. Kuorman puolella kytkentätaajuuden monikerrat ja diodit ovat pääsyy häiriöihin. [4]

Sähkömagneettinen häiriö voi indusoida magneettikentän (induktiivinen kytketyminen) tai sähkökentän (kapasitiivinen kytketyminen) kautta.

Muuttuvat virrat johtimissa aiheuttavat magneettikentän, joka saattaa indusoida jännitteen muihin johtimiin kaavan 1 mukaisesti.

$$e = M \times di/dt, \quad (1)$$

jossa  $M$  on johtimien keskinäis-induktanssi ja  $e$  on indusoidun jännite ja  $di/dt$  on virran muutosnopeus.

Sähkökenttä saattaa vastaavasti indusoida virran toiseen johtimeen kaavan 2 mukaisesti.

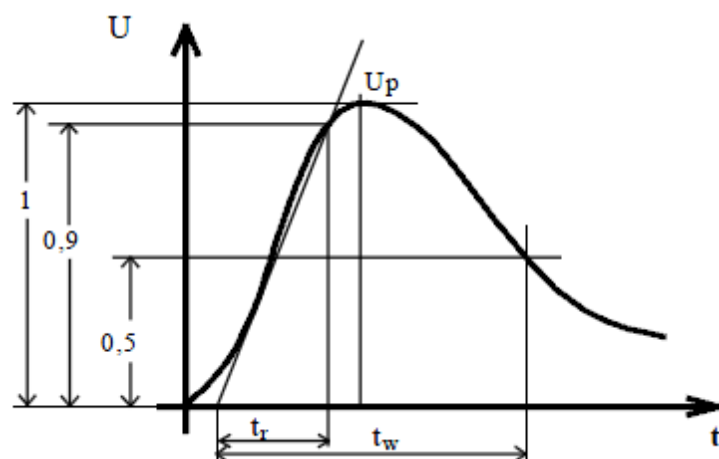
$$i = C \times dv/dt, \quad (2)$$

jossa  $C$  on lähteen ja vastaanottajan välinen loiskapasitanssi ja  $i$  on indusoitunut virta ja  $dv/dt$  on jännitteen muutosnopeus.

Sähkömagneettiset häiriöt voivat edellä mainittujen sähkö- ja magneettikenttien avulla, tai johtumalla syöttö-, lähtö- tai ohjauslinjoista, jotka yhdistävät laitteen muihin järjestelmän osiin, missä nämä johtimet saattavat muuttua häiriösäteilijöiksi. Häiriökytkeytyminen on taajuusriippuvaista: Suurilla taajuuksilla on suurempi todennäköisyys säteilevään kytkeytymiseen, kun taas matalilla taajuuksilla ongelmat aiheutuvat todennäköisemmin johtuvista häiriöistä. Yleisesti johtuvien ja säteilevien häiriöiden rajataajuutena pidetään 30 MHz:n taajuutta. Jolloin alle 30 MHz:n taajuudet ovat johtuvia häiriöitä ja suuremmat taajuudet säteileviä häiriöitä. [3, s. 2]

### 3.1 Johtuvat häiriöt

Transientti on muutosilmiö, joka esiintyy siirryttäessä jatkuvasta tilasta toiseen. Virran tai jännitteen nopea muutos on useimmiten transientin aiheuttaja. Kuvassa 3.1 on näkyvät transientin määrittelyparametrit: nousuaika ( $t_r$ ), kesto aika ( $t_w$ ) ja amplitudi ( $U_p$ ). [5]

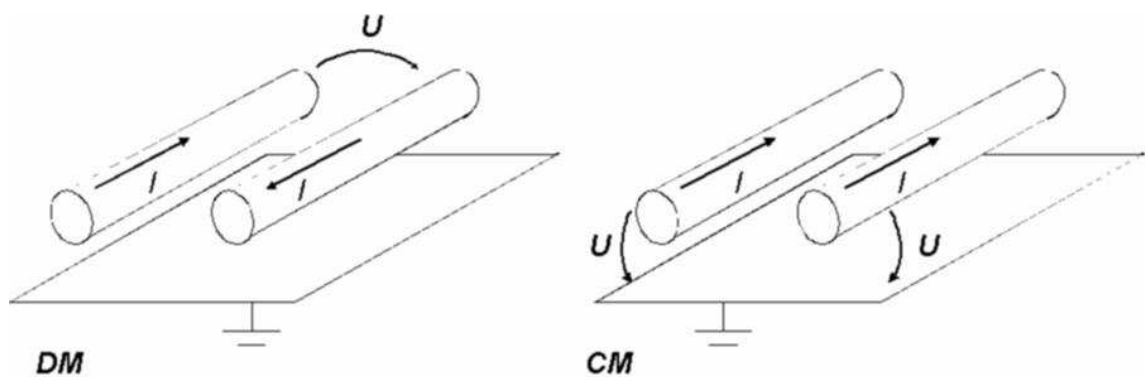


Kuva 3.1 Transientti [6]

Johtuvat häiriösignaalit kulkeutuvat nimensä mukaisesti johtumalla piirilevyvetoja tai kaapeleita pitkin. Johtuvat häiriöt voidaan jakaa kahteen tyyppiin: yhteismuotoiseen (CM, epäsymmetrinen) ja differentiaaliseen (DM, eromuotoinen) häiriöön.

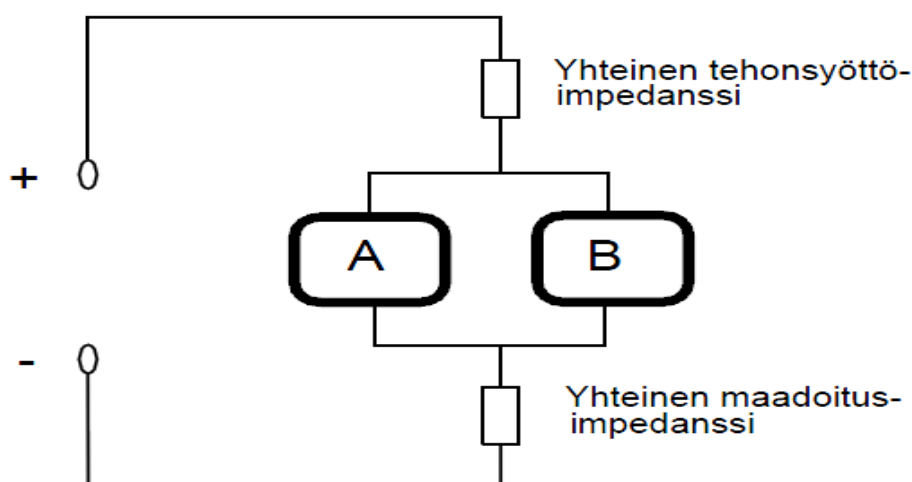
Differentiaalinen häiriö kytkeytyy piiriin kuten hyötysignaalikin eli se voidaan mitata meno- ja paluujohtimen välisenä virtana tai jännitteenä. Differentiaalinen häiriö syntyy esim. magneettikentän indusoidessa johtimiin erisuuruiset jännitteet. [5] .

Yhteismuotoinen häiriö esiintyy signaalijohtimissa samanvaiheisena, jolloin se voidaan mitata samanvaiheisena virtana tai jännitteenä signaalijohtimien ja maan välillä. Yhteismuotoinen häiriö ei suoraan aiheuta jännite-eroa johdinten välille. Kuvassa 3.2 on havainnollistettu yhteismuotoisen ja eromuotoisen häiriön kulkeutumista johtimissa.[6] Yhteismuotoinen häiriö syntyy esim. magneettikentän indusoidessa molempiin johtimiin yhtä suuren häiriön. [5]



**Kuva 3.2** DM ja CM häiriöiden kulkeutuminen johtimissa [6]

Häiriöt voivat kytkeytyä lisäksi yhteisten impedanssien kautta (common impedance coupling). Kyseinen häiriökytkeytyminen on mahdollista jos häiritsevällä ja häiriintyvällä piirillä on yhteinen virran kulkutie. Yleensä yhteinen impedanssi löytyy maadoituksesta tai tehonsyötöstä. Kuvassa 3.3 on esitetty kahden piirin yhteiset impedanssit. Kuvan tapauksessa muutokset häiritsevän piirin (A) virrassa aiheuttavat häiriön toiseen piiriin (B). [5]



**Kuva 3.3** häiritsevän (A) piirin ja häiriintyvän (B) piirin yhteiset impedanssit [5, s.13]

### 3.2 Säteilevät häiriöt

Säteilevillä häiriöillä tarkoitetaan radiotaajuisia häiriöitä (Radio Frequency Interference, RFI), jotka voidaan jakaa laajakaistaisiin ja kapeakaistaisiin häiriöihin. Suurin osa elektronisista laitteista synnyttää laajakaistaista häiriötä. Kapeakaistaisia häiriönlähteitä ovat esim. radiolähtetimet, jotka lähettävät jotakin tiettyä kantoaaltoa. [5, s.10]

Mikäli johtuvia häiriöitä vähennetään vähenevät säteilevät häiriötkin usein huomattavasti [4, s. 83]. Säteileviä häiriöitä pystytään omalta osaltaan pienentämään huolellisella piirilevysuunnittelulla. Johdinsilmukat tulisi pitää mahdollisimman lyhyinä, koska silmukan pienentyessä pienenee myös silmukan ympäristöönsä säteilevä sähkömagneettinen kenttä. Säteilyä pienentää myös sähköä johtava kotelo. Suuri osa tehoelektroniikan häiriöistä syntyy usein ulkoisen kaapeloinnin kautta häiriötaajuuksien ollessa pääasiassa 150 kHz – 30 MHz taajuusalueella. [7, s. 214–215]

## 4 EMC-SUUNNITTELU

EMC suunnittelu pitäisi aloittaa mahdollisimman aikaisessa vaiheessa uutta laitetta kehitettäessä. Jos näin ei tehdä, tulee EMI-suodattimesta usein tarpeettoman suurikokoinen ja kallis. Tässä luvussa käsitellään asioita, joita suunnittelussa tulisi huomioida.

Riittävän kokoisen kelan asettaminen varastokondensaattorin eteen poistaa suuret virtapiikit. Jos tämä kela jätetään pois, kasvaa EMI-suodattimen koko, paino ja hinta. Varsinkin jos on kyse sotilaskäyttöön tulevasta laitteesta, joiden vaatimukset ovat kovemmat.

Kunnollisten snubbereiden (apupiiri, vaimennin) käyttö kytkimissä vähentää jännitepiikkejä ja käänteissuuntaisia virtoja diodien läpi, jolloin diodeista aiheutuvat häiriöt pienenevät.

Jokainen syöttö on syytä suodattaa. Suodatus tulisi sijoittaa mahdollisimman lähelle potentiaalista häiriölähdettä, jolloin se ei pääse kytkeytymään muihin piireihin ja mahdollisesti vahvistumaan niissä. Suodattimia käsitellään tarkemmin kappaleessa 4.2. [4].

### 4.1 Komponentit

#### 4.1.1 Kondensaattorit

Suurilla elektrolyyttikondensaattoreilla on usein pieni ominaisresonanssitaajuus (SRF, Self Resonant Frequency). Vanha suunnitteluteknikka on asettaa toinen esim. kertoimella 0,05 pienempi kondensaattori alkuperäisen rinnalle. Tällä pienemällä kondensaattorilla on suurempi SRF-arvo ja matalammat loisresistanssit (ESR) ja loisinduktanssit (ESL). Hyvä valinta -rinnankytkentäkondensaattoriksi on keraaminen tai filmikondensaattori.

Toinen tapa pienentää kondensaattorien ESL-arvoa ja samalla kasvattaa SRF:ää on pyrkiä minimoimaan hajainduktanssit. Varsinkin läpiladottavien kondensaattorien jalat lisäävät ESL-arvoja ja ESR-arvoja sekä laskevat samalla kondensaattorin ominaisresonanssitaajuutta, joten ne tulisi pitää mahdollisimman lyhyinä. Myös

piirilevyn vedot lisäävät pienen lisänsä induktanssiin. Piirilevyn vedot tulisikin pitää mahdollisimman lyhyinä. [4, s.107]

#### **4.1.2 Komponenttien sijoittelu**

Induktiivisten komponenttien ja kytkimien asettelulla piirilevylle on myös merkitystä. Kelojen ja kuristimien magneettikenttä saattaa indusoida virtoja viereisiin häiriöille alttiisiin piireihin. Esim. muuntajan aiheuttamaa magneettista kytkeytymistä voidaan vähentää sijoittamalla muuntaja kauemmas mahdollisesta vastaanottavasta piiristä. Joskus muuntajasta säteilevä magneettikenttä on eri suuruinen eri suunnissa, jolloin muuntajan asennollakin saattaa olla merkitystä. Toroidimalliset muuntajat ja kelat ovat usein hyvä ratkaisu, sillä niiden magneettikenttä on keskittynyt pääasiassa kelan sydänmateriaalin ympäristöön. Kelat tulisi pyrkiä asettamaan piirilevylle kohtisuoraan toisiinsa nähden. Tämä vähentää kelojen keskinäistä induktiivista kytkeytymistä. Saatavilla on myös koteloituja keloja, joiden magneettikenttä on huomattavasti vaimeampi koteloinnin ansiosta.

Voimakkaat häiriölähteet on mahdollista koteloida magneetti- ja sähkökenttien pienentämiseksi. Kotelot ovat usein pinnoitettu esim. hopealla pintajohtavuuden parantamiseksi. Mitä suurempi johtavuus kotelolla on, sitä paremmin häiriökentät vaimenevat. Kotelointi on kuitenkin usein melko kallis ratkaisu. [4]

#### **4.2 Suodattimet**

Johtuvia yhteismuotoisia häiriöitä vastaan suojaudutaan useimmiten suodattimilla. Käytännön suodattimet eivät ole ideaalisia vaan niiden komponentit sisältävät erilaisia hajasuureita. Kondensaattoreilla on ESR- ja ESR-arvot ja kelalla on loiskapasitanssia ja loisresistanssia. Käyttämällä yhden suuren kondensaattorin sijasta useampia pienempiä kondensaattoreita rinnan kytkettyinä voidaan pienentää loisarvoja ja saavuttaa parempi vaste.

Yhteismuotoista häiriötä saadaan vähennettyä tehokkaasti käyttämällä yhteismuotoista kuristinta ja kytkemällä kondensaattoreita linjasta maahan. [3, s. 6]



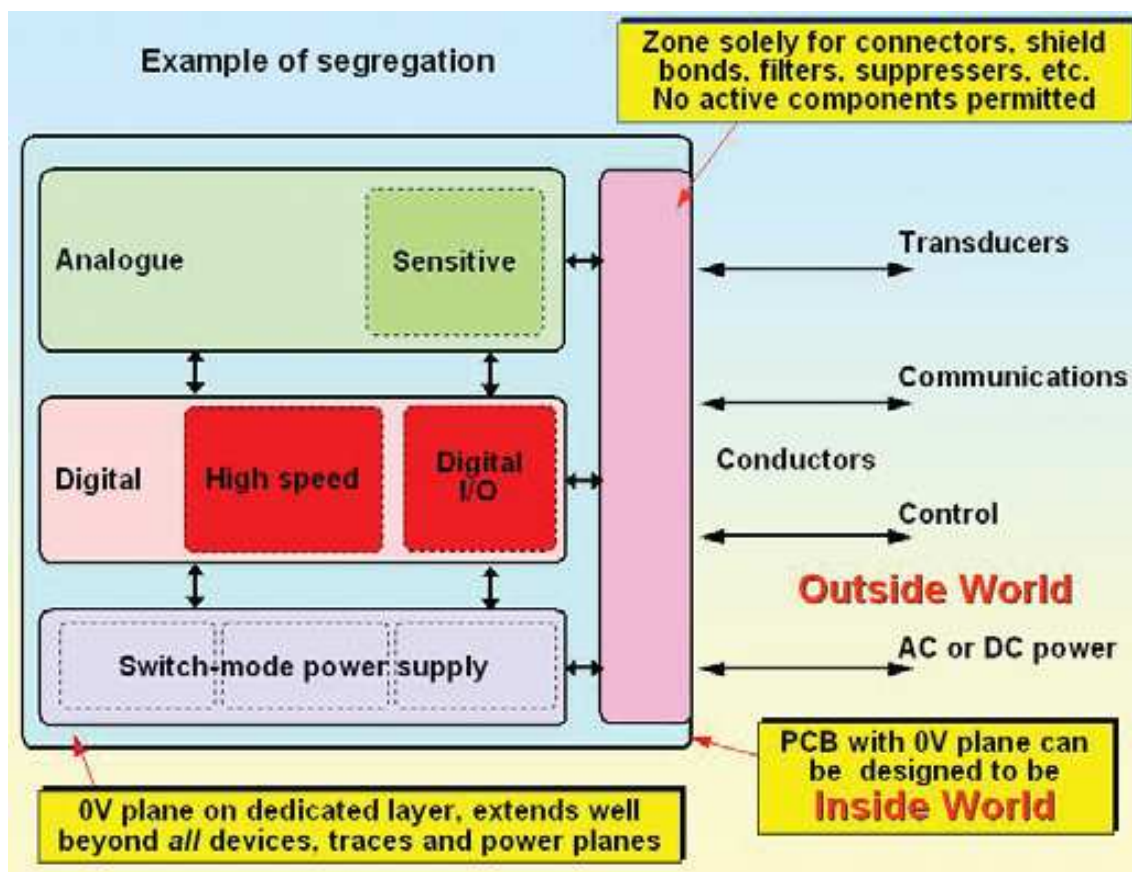
L -tyypin suodatin on yleisimmin käytetty suodatintyyppi ja sopii hyvin suuritehoisiin sovelluksiin. L -suodattimella saavutetaan katkوتاajuuden jälkeen 12 dB vaimennus oktaavia kohden. Asettamalla kaksi L -suodatinta peräkkäin saataisiin vaimennukseksi 24dB oktaavia kohden ja tarvittavat komponenttiarvot keloille ja kondensaattoreille olisivat huomattavasti pienemmät. Pienempi lähtökondensaattorin arvo saattaa muodostua kuitenkin ongelmaksi, mikäli kuorma on kytkintyyppinen. Pieni kondensaattori ei välttämättä kykene toimimaan riittävänä energiavarastona, mikä saattaa näkyä lähtöjännitteen aaltoiluna kuorman kytkentätaajuudella. Kaksinkertaista L -suodatinta voidaan käyttää jos jännitteen lasku ei ole liian suuri tai kuorman kytkentätaajuus on riittävän suuri. [4, s. 98]

### 4.3 Piirilevy ja kotelo

Huolellisella piirilevysuunnittelulla voidaan pienentää sähkömagneettisia häiriöitä huomattavasti. Induktiivisesti kytkeytyviä häiriöitä voidaan pienentää vähentämällä johtimien keksinäisinduktanssia. Tämä saadaan aikaan mm. vetämällä signaalijohdot ja niiden maadoitusjohdot piirilevyllä lähekkäin ja suurentamalla johtimien etäisyyksiä. Yhdensuuntaisia johdotuksia tulisi välttää. Tiivis ja johtava kotelo vähentää myös induktiivista kytkeytymistä. [6, s. 12]

Kapasitiivisesti kytkeytyviä häiriöitä voidaan vähentää pienentämällä johdinten välistä kapasitanssia. Myös kapasitiivisia häiriöitä vastaan voidaan suojautua koteloinnilla, johtimien etäisyyttä kasvattamalla ja sijoittamalla johtimet lähelle maatasoa. Kytkentöjen impedanssiatasojen pienentäminen pienentää myös kapasitiivisesti kytkeytyviä häiriöitä. [6, s. 11]

Piirilevyllä tulee olla laajat yhtenäiset maatasot. Levyn osioiminen lohkoihin on tehokas keino parantaa laitteen EMC ominaisuuksia. Häiriölliset piirit tulisi pitää omina lohkoinaan ja erillään herkistä piireistä. Kuvassa 4.1 on havainnollistettu piirilevyn osiontia erillisiksi lohkoiksi. [8]



Kuva 4.1 Esimerkki piirilevyn osiinnista [8]

## 5 TEHOLÄHTEEN RAKENNE

Teholähde suunniteltiin Elcon:ille jo entuudestaan tuttuja DC/DC-moduuleja hyödyntäen. Valitut moduulit perustuvat tahdistettuun tasasuuntaukseen, mistä johtuen niillä on korkea hyötysuhde. Moduulit on koteloitu mekaanisen kestävyuden parantamiseksi. Moduuleissa on myös sisäiset ylijännite-, alijännite-, ylivirta- ja lämpötilasuojaukset. Tarvittaessa moduulit pystytään ohjaamaan ohjausjännitteellä päälle ja pois päältä. Komponenttivalinnoissa suosittiin pintaliitosmalleja. Komponentit pyrittiin valitsemaan myös mahdollisimman kevyiksi ja suhteellisen pienikokoisiksi tärinänkestävyyden parantamiseksi.

### 5.1 Lähtöjen valvonta ja suojaus

Käytetyissä moduuleissa on sisäänrakennettuna ylijännite-, alijännite-, ylivirta- ja lämpötilasuojaukset. Esim. virran ylittäessä  $1,2 \times I_{nom}$  kytkeytyy moduuli pois päältä ja moduuli yrittää sen jälkeen käynnistyä 200 ms:n välein. Moduulien omat rajat eivät kuitenkaan olleet riittävän tarkat, joten ulkoiset valvonta- ja suojauskytkennät suunniteltiin.

Kuten jo luvussa 2.3 todettiin, on tärkeää että lähtöjen jännitteet pysyvät määritetyissä rajoissa. Valmistaja lupaa käytetyille moduuleille maksimissaan  $\pm 0,3 \%$  hajonnan linja- ja kuormajännitteille. Lisäksi lämpötilasta aiheutuva hajonta oli määritetty maksimissaan  $\pm 1,5 \%$  suuruiseksi. Lähdöille päätettiin sallia  $5 \%$  vaihtelu nimellisjännitteen ympärillä johtuen lähinnä laitteen laajasta käyttölämpötila-alueesta. Teholähteen yli- ja alijänniterajat on dokumentoitu taulukossa 5.1, missä Uuv on alijänniteraja, Uov on ylijänniteraja, Uuvw on alijännitevaroitusta, Uovw on ylijännitevaroitusta. Alijännite- ja ylijännitevaroitusten kohdalla keltainen syttyy keltainen led. Alijännite- ja ylijänniterajoilla punainen led syttyy ja moduuli sammutetaan.

**Taulukko 5.1** Teholähteen yli- ja alijänniterajat.

$U_{nom} / V$	$U_{uv} / V$	$U_{ov} / V$	$U_{uvw} / V$	$U_{ovw} / V$
5,15	4,9 (95,1%)	5,4 (104,9%)	-	-
10,25	7,2 (70%)	11,5 (112,5%)	9,7 (95%)	10,8 (105%)
12,1	11,6 (95,9%)	12,7 (105%)	-	-
-12	-8,4 (70%)	-13,5 (112,5%)	-11,4 (95%)	-12,6 (105%)
15	13 (70%)	16,9 (112,5%)	14,3 (95%)	15,8 (105%)
24	16,8 (70%)	27 (112,5%)	22,8 (95%)	25,2 (105%)

Kuten taulukosta 5.1 huomataan, ovat 5,15 V ja 12,1 V lähdöt jänniterajoiltaan tarkempia kuin muut lähdöt ja rajojen ylittyessä ne sammutetaan suoraan ilman keltaista lediä. Asiakkaan toiveesta jännitteen laskiessa jossakin lähdössä määritetyn rajan alle myös 24 V:n lähtö pitää sammuttaa. Uudelleenkäynnistys vaatisi tässä tapauksessa manuaalisen kuittauksen. [1]

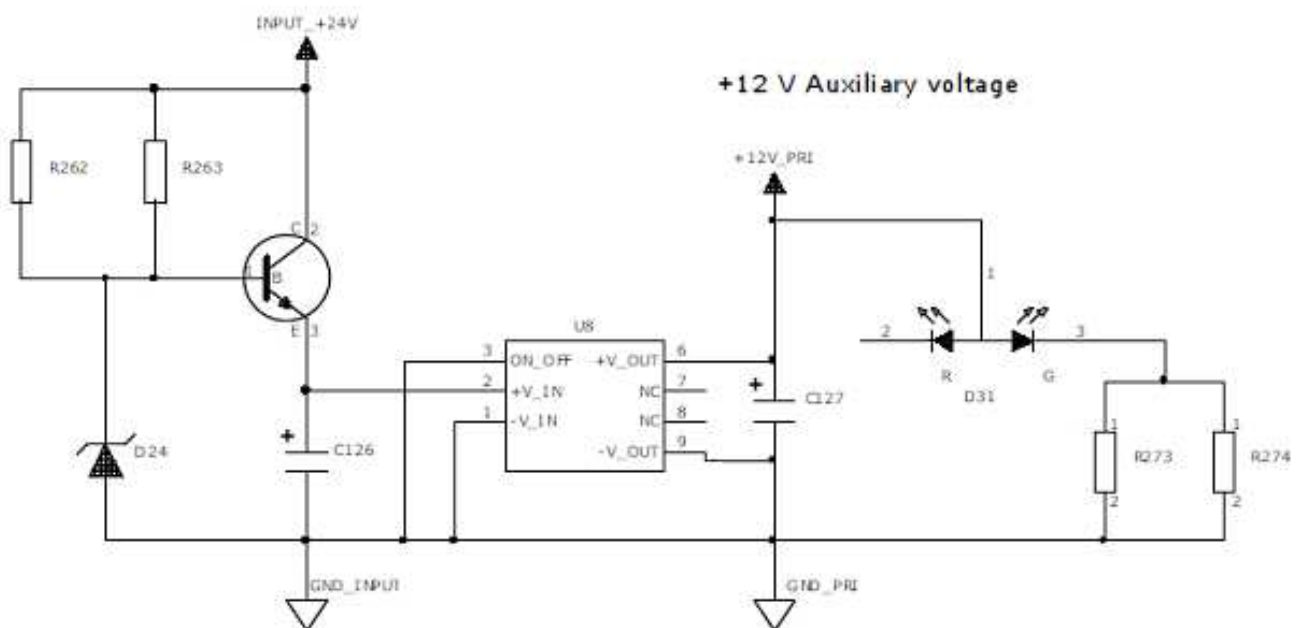
Lähtöjännitteestä muodostettiin vastusjaoilla sopivia jännitetasoja, joita verrattiin komparaattorikytkennällä 2,5 V:n referenssijännitteeseen. Lähtöjen testipisteiden lisäksi lisättiin kaksivärinen (punainen/vihreä) led kertomaan lähdön tilasta, jolloin vianmääritys olisi mahdollisessa vikatilanteessa nopeampaa. Vihreä led palaa, kun lähtö on 5 % toleranssinsa sisällä. Lähdön ylittäessä tai alittaessa 5 % tason syttyy myös punainen led, jolloin saadaan keltainen valo varoittamaan yli- tai alijännitteestä. Mikäli jännite on välillä  $70 \times U_{nom}$  ja  $1,125 \times U_{nom}$  sammuu vihreä led, jolloin jäljelle jää punainen valo kertomaan viasta. Tämän lisäksi DC/DC-lähde ajetaan optoerottimen avulla pois päältä JKV laitteiden vaurioitumisen estämiseksi. Aikavakio yli- tai alijännitteen havaitsemiseksi on 1 s, jolloin tehollähde ei sammu mahdollisista lyhyistä häiriöistä.

Lähdön antamaa virtaa mitataan virranmittausvastuksella. Virranmittausvastuksen yli jäävä jännite vahvistetaan ja vahvistettua jännitettä seurataan

komparaattorikytkennällä. Virranmittausvastuksen jännitteen ylittäessä kriittisen arvon, ajetaan kyseinen DC/DC-moduuli ja 24V :n moduuli optoerottimen välityksellä pois päältä.

## 5.2 Apujännitepiiri

Valvonta- ja ohjauselektronikkaa varten suunniteltiin apujännitepiiri. Myös apujännite päätettiin tuottaa valmiilla DC/DC-moduulilla. Tehontarve ei ollut kovin suuri joten moduuliksi valittiin teholtaan 3 W:n moduuli, jolla on suurin piirtein sama hakkuritaajuus kuin muillakin käytetyillä moduuleilla. Laitteen laajan tulojännitealueen takia kyseistä moduulia ei voitu kytkeä suoraan tulojännitteeseen vaan tulojännite piti rajoittaa sopivalle tasolle. Kuvassa 5.1 on apujännitepiirin piirikaavio.



**Kuva 5.1** Apujännitepiiri.

Jännitteenrajoituspiiri on kaaviossa DC/DC-moduulin edellä. Rajoituspiiri koostuu tehotransistorista, vastuksista ja zener diodista. Transistori syöttää moduulia ja ylijännitetilanteessa jännite hävitetään transistoriin. Diodin tehtävänä on rajoittaa transistorin kantajännite sopivalle tasolle.

Ylijännitetilanteessa transistori ei kykene hukkaamaan kaikkea tehoa ilman jäähdytystä, joten transistorille piti mitoittaa sopiva jäähdytyslevy. Moduulin ottama virta voidaan laskea kaavasta (4), missä  $\eta$  on hyötysuhde. Transistorin vaatima jäähdytysteho laskettiin kaavasta (5), missä  $U_{ce}$  on transistorin yli jäävä jännite. Transistorin lämpöresistanssi ratkaistiin kaavasta (6), missä  $R_{ja}$  on lämpöresistanssi liitoksesta ympäristöön,  $T_A$  on ympäristön lämpötila ja  $T_{jmax}$  on liitoksen maksimilämpötila. Jäähdytyslevyn arvo saatiin kaavasta (7), missä  $R_{jc}$  on lämpöresistanssi liitoksesta koteloon ja  $R_{cs}$  on lämpöresistanssi kotelosta jäähdytyslevyyn.

$$I_{in} = (U_{out} \times I_{out}) / (\eta \times U_{in}) \quad (4)$$

$$P_{npn} = U_{ce} \times I_{in} \quad (5)$$

$$R_{ja} = (T_{jmax} - T_A) / P_{npn} \quad (6)$$

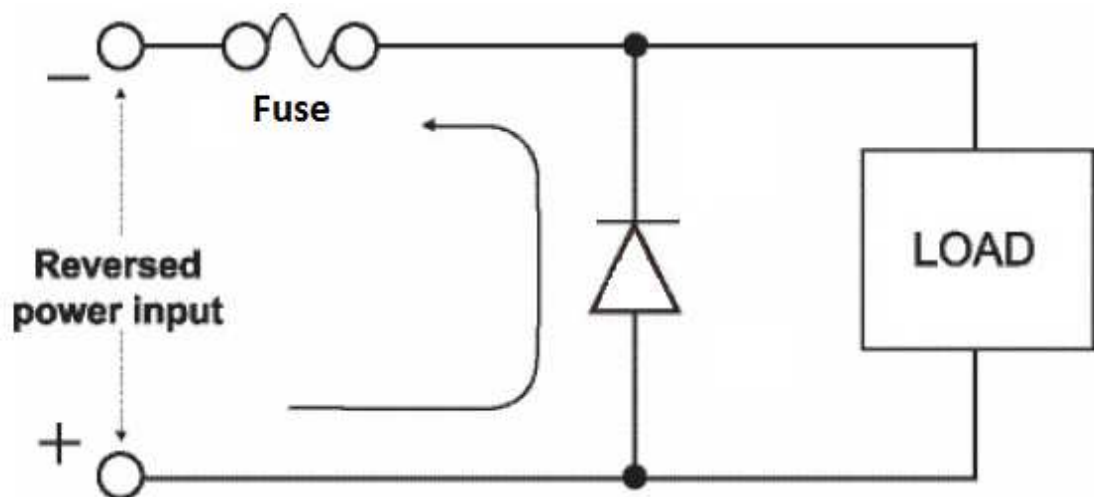
$$R_{sa} = R_{ja} - R_{jc} - R_{cs} \quad (7)$$

[9]

### 5.3 Polariteettisuoja

Teholähde haluttiin suojata vääränapaiselta kytkennältä. Koska uudessa laitteessa tulisi olemaan samat liittimet kuin vanhassa ei mekaaninen ratkaisu, jossa liittimet eivät sopisi väärin päin, tulisi kyseeseen. Lisäksi laitteeseen tulee ainoastaan ulkoinen sulake.

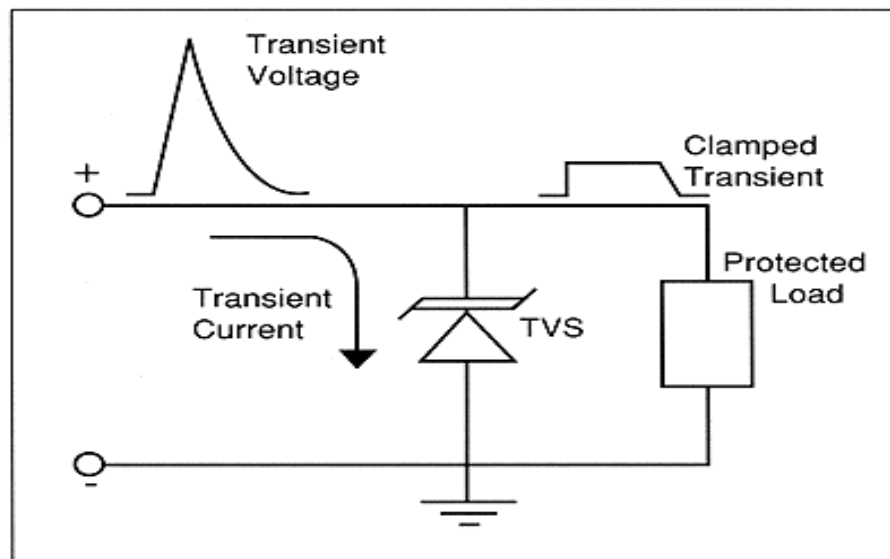
Laite voidaan suojata tehodiodilla, joka asetetaan siten että se on normaalisti estosuunnassa. Jos käyttöjännite kytketään väärin päin alkaa diodi johtaa, jolloin virta diodin läpi nousee nopeasti suureksi ja ulkoinen sulake laukeaa. Tällöin täytyy huolehtia, että diodin  $I^2t$ -arvo on suurempi kuin sulakkeen  $I^2t$ -arvo. Eli toisin sanoen sulakkeen tulee toimia ennen diodin tuhoutumista.  $I^2t$ -arvo on oikosulkuvirran neliön aikaintegraali, joka kertoo kuinka paljon diodi kestää tehoa ennen hajoamistaan tai sulake kestää ennen laukeamistaan. [7]



**Kuva 5.2** Suojadiodi vääränapaisen syöttöjännitteen varalle.

#### 5.4 Transienttisuoja

Teholähteen tulee kestää 1,8 kV:n ylijännite, joka syötetään tulo- ja lähtöliittimiin. Tähän tarkoitukseen valittiin TVS-diodeja. TVS-diodeja rajoittaa ylijännitepiikin omaa vyöryntäjännitteensä tasolle ja pystyy absorboimaan hetkellisesti suuriakin tehoja. TVS:n toiminta ylijännitepiikin aikana on havainnollistettu kuvassa 5.1.



**Kuva 5.1** TVS:n toiminta [10]

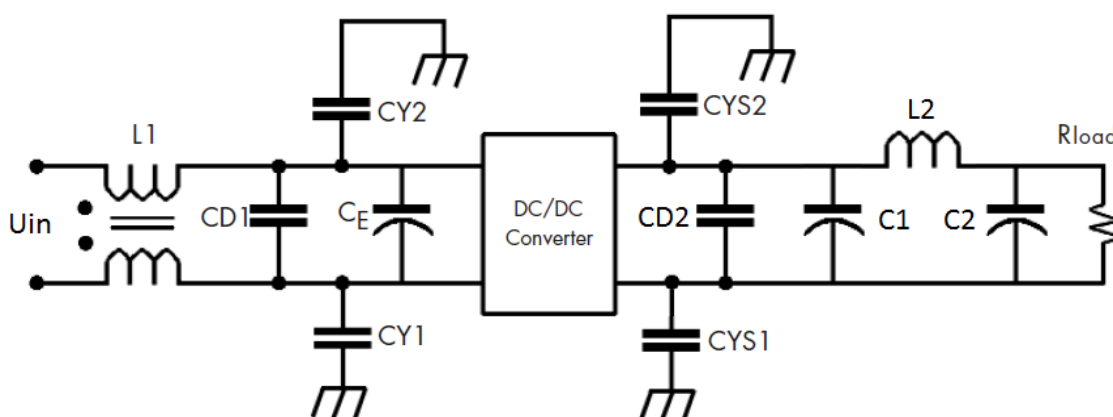
TVS-diodit sijoitettiin laitteen tuloon ja jokaiseen lähtöön. Lisäksi laitteen tulee kestää suuruudeltaan  $3,5 \times U_{nom}$  ylijännite 20 ms:n ajan. Laitteen nimellinen käyttöjännite on 24 V, jolloin sen tulee kestää 84 V:n ylijännite. Laitteeseen valitut DC/DC-moduulit on suojattu amplitudiltaan 100 V:n ja kestoaltaan 1 sekunnin ylijännitteiden varalle, jolloin erillistä suojauskytkentää ei tarvittu moduuleja varten.

## 5.5 Suodatus

### 5.5.1 Tulopuolen suodatus

Suunniteltavan teholähteen häiriöt aiheutuvat pääasiassa DC/DC-moduuleista. Näitä häiriöitä vastaan suunniteltiin suodatus moduulin tulo- ja lähtöpuolelle.

Tulopuolen suodatus perustui suurelta osin moduulien valmistajan suosituksiin. Yhteismuotoisia häiriöitä vaimentamaan sijoitettiin moduulin eteen yhteismuotoinen kuristin. Syöttökondensaattorin rinnalle lisättiin pieni keraaminen kondensaattori taajuuskäyttäytymisen parantamiseksi. Lisäksi tulo- ja lähtöpuolelle sijoitettiin linjasta suojamaahan Y-kondensaattorit, jotka omalta osaltaan vaimentavat yhteismuotoisia häiriöitä. Y-kondensaattoreiden valinnassa huomioitiin laitteen eristysvaatimukset. Kuvassa 5.2 on kuvattuna moduulin suodatus.



**Kuva 5.2** moduulin suodatus



### 5.5.2 Lähdön suodatus

Moduulin lähtöpuolelle mitoitettiin LC-suodatin vaimentamaan DC/DC-moduulin aiheuttamia häiriöitä. Suodattimen vaimennukseksi haluttiin vähintään 80 dB hakkuritaajuudella. Suodattimen mitoitukseen käytettiin seuraavia kaavoja:

Suodattimen rajataajuus saadaan laskettua kaavasta (6).

$$F_o = \frac{F}{2^{(dB/L)}} \quad (6)$$

,missä L on suodattimen vaimennus per oktaavi ja dB on haluttu vaimennus ja F on taajuus, jolla vaimennus halutaan.

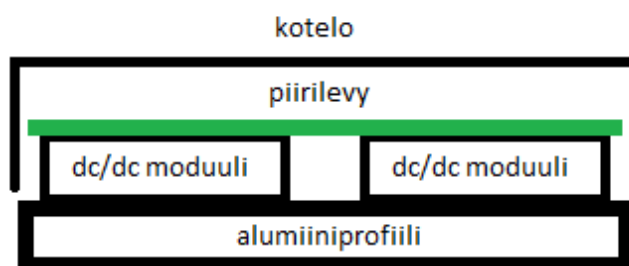
Yksinkertaisen LC-suodattimen rajataajuus on saadaan ratkaistua kaavasta (7), jonka avulla ratkaistiin tarvittavat komponenttiarvot.

$$F_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

LC-suodattimen komponentit valittiin mahdollisimman laadukkaiksi. Kelaksi valittiin koteloitu pintaliitosmalli, jonka häiriökenttä on koteloinnin ansiosta pienempi kuin koteloimattoman kelan. Kondensaattoriksi valittiin pieni ESR-arvoinen versio, mikä parantaa suodattimen vastetta ja tasaa myös lähtöjännitteen muutoksia. [4, s. 305]

## 5.6 Piirilevyt

Teholähde suunniteltiin korvattavan laitteen koteloon, mikä määräsi piirilevyn koon (240 x 194 mm) ja osan kiinnitysruuvien paikoista. Laitteen DC/DC-moduulit sijoitettiin kotelon alumiiniprofiilia vasten, jolloin alumiiniprofiili toimii jäähdytyslevynä moduuleille, joiden päälle laitteen päälevy puolestaan sijoitettiin. Kuva 5.3 havainnollistaa laitteen mekaniikkaa.



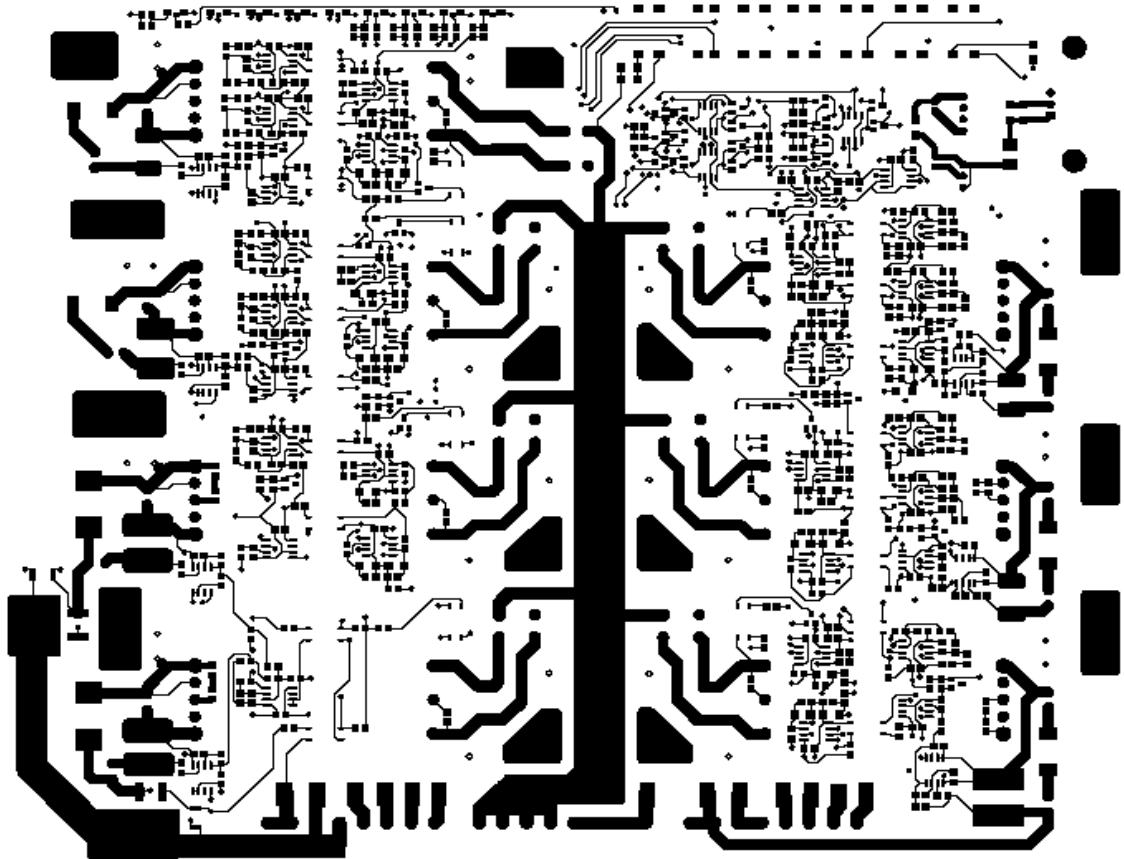
**Kuva 5.3** moduulien sijoittelu teholähteessä

Piirilevy suunniteltiin PADS -ohjelmistolla. Laite koostuu kahdesta piirilevystä:

Suuremmasta päälevystä (Levy A), jossa sijaitsee suurin osa teholähteen elektroniikasta ja pienemmästä syöttölevystä (Levy B), jossa ovat tulo- ja lähtöliittimien lisäksi polariteettisuojaus ja joitakin suodatuskomponentteja.

Board A on nelikerrospiirilevy. Suuria virtoja kuljettavat tulo- ja lähtövedot sijoitettiin piirilevyn ala- ja päällipuolelle mahdollisimman hyvän jäähdytymisen saavuttamiseksi. Tarvittavia johdinleveyksiä arvioitiin PCBTemp ohjelmalla. Levyn päällipuolelle sijoitettiin suurin osa komponenteista. Levyn ylemmän sisäkerrokseen vedettiin apujänniteiden lisäksi osa ohjauselektroniikan vedoista. Alempi sisäkerros koostuu pääasiassa maatasoista, joista pyrittiin tekemään mahdollisimman suuret häiriöiden vähentämiseksi. Johtimien pituudet pyrittiin minimoimaan piirilevyllä. Levy jaoteltiin lohkoihin EMC ominaisuuksien parantamiseksi ja testauksen helpottamiseksi. Levyn keskelle ensiöpuoli ja levyn sivuille toisiopuoli. Kuvassa 5.4 on Levy A:n päällipuoli,

josta näkyy pintapuolen piirilevyvedot. Keskellä oleva paksu veto on tulojännitteelle ja reunoilta lähtevät lähtöjännitteet levyn alaosan liittimelle. Moduulit ruuvattiin kiinni jäähdytysprofiiliin ja piirilevy kiinnitettiin useilla ruuveilla jäähdytyslevyyn ja koteloon. Näin laitteesta saatiin mekaanisesti jäykkä ja paremmin tärinää sietävä.



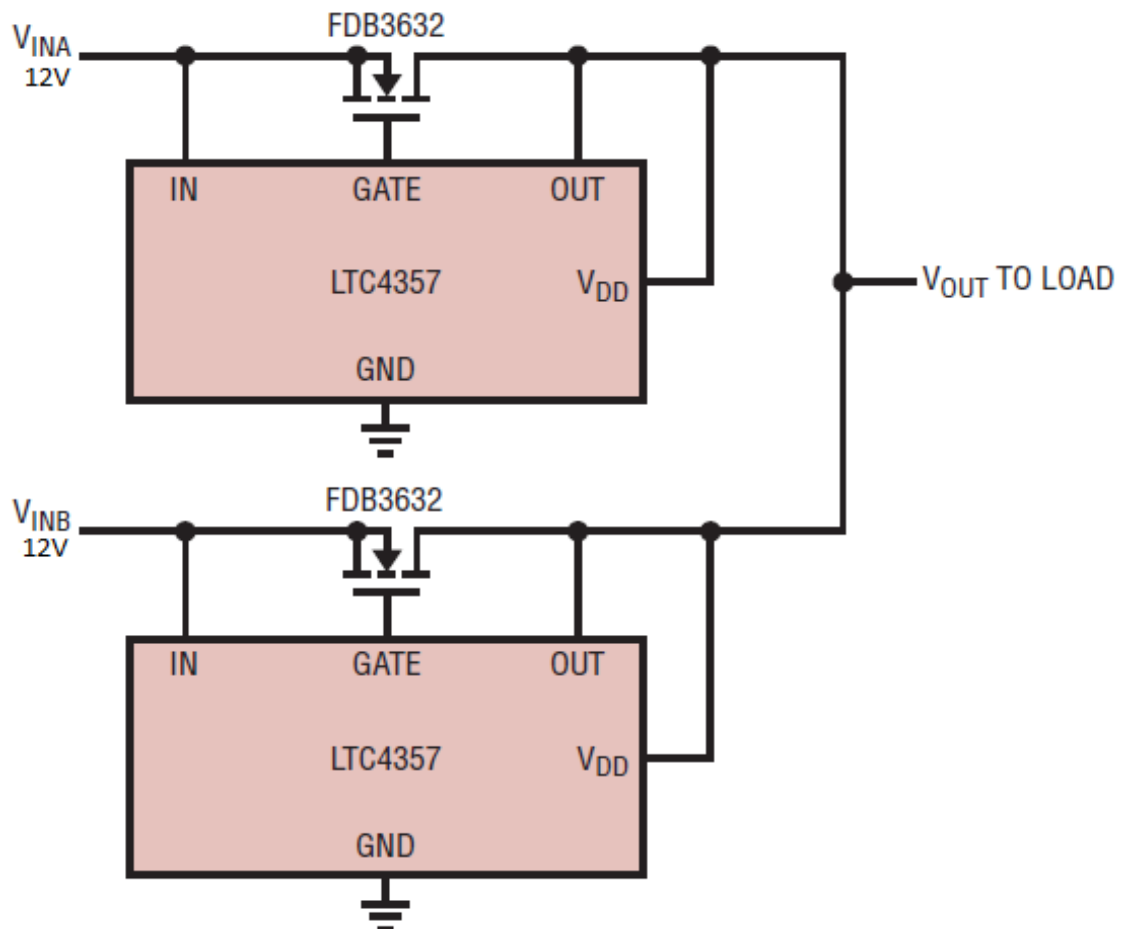
Kuva 5.4 Levy A:n päällipuoli

## 6 LUOTETTAVUUDEN PARANTAMINEN JA TESTAUS

### 6.1 Moduulien rinnankytkentä

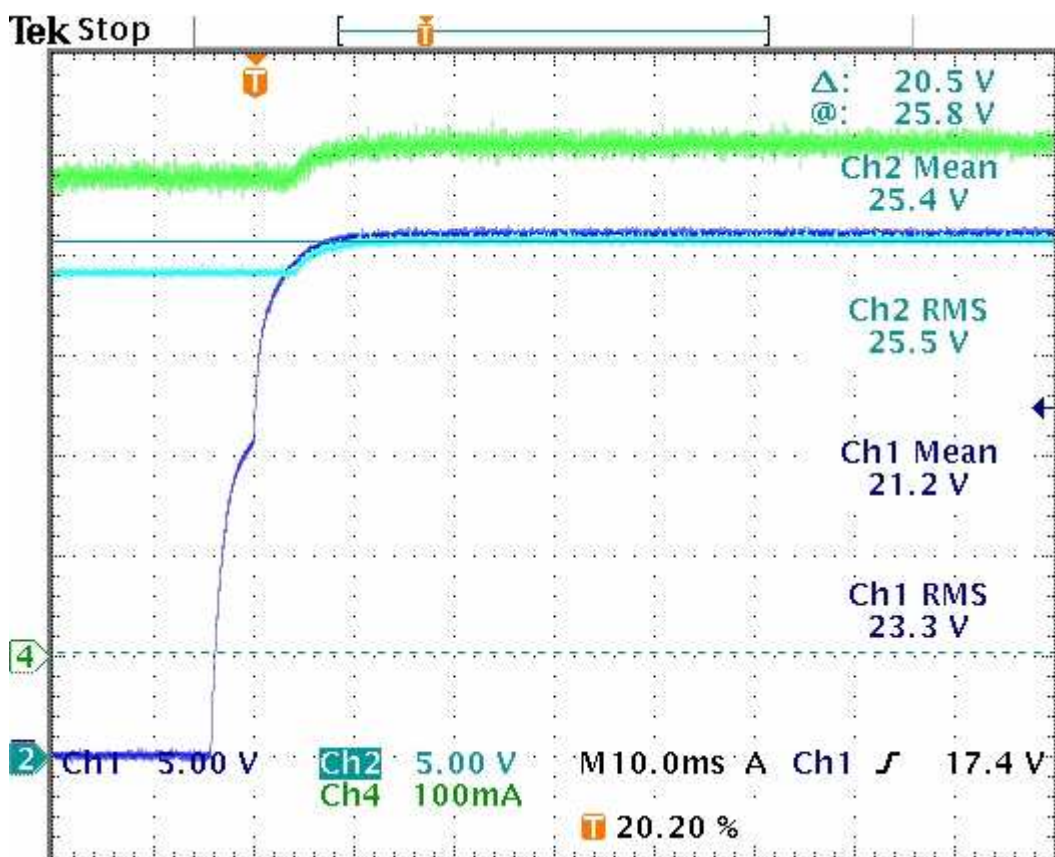
Luotettavuuden parantamiseksi laitteen 12,1 V:n lähtö päätettiin toteuttaa kytkemällä kaksi moduulia rinnan. Tällöin kyseinen lähtö pysyy jännitteisenä, vaikka toinen moduuli jostain syystä vikaantuisikin. Perinteinen tapa on ollut käyttää diodeja rinnankytkentään. Diodeja käytettäessä ongelmana on kuitenkin diodien yli jäävä jännitehäviö.

Rinnankytkelmä toteutettiin ideaaliodiodipiireillä, jotka kytkivät moduulien lähdöt kuormaan MOSFETien avulla. Ideaaliodiodipiirin etuna on huomattavasti pienemmät häviöt verrattuna pelkkään diodikytkentään. Ideaaliodiodipiiri ohjaa N -kanavaista MOSFETia, joka kytkee moduulien lähdöt kuormaan ja vikatilanteessa ajaa MOSFETin nopeasti pois päältä. Kuvassa 6.1 on esitetty rinnankytkennän piirikaavio.



**Kuva 6.1** 12V OR LTC4357 piirillä [11]

Piirin toiminta varmistettiin testikytkennällä. Kuvassa 6.2 on oskilloskooppikuva rinnankytkennästä. Kyseisessä mittaustilanteessa oli rinnankytkettyinä kaksi DC/DC-moduulia, joista toinen oli säädetty 23,35 V:n jännitteeseen ja toinen 26 V:n jännitteeseen. Kuvasta 6.2 nähdään kuorman jännite, kun 26 V:n moduuli kytketään päälle 24,35 V:n rinnalle. Kuorman jännite nousee nopeasti ilman oskillointia korkeampaan jännitteeseen, kuten ideaalidiodipiirin datalehdellä luvataankin.



**Kuva 6.2** Oskilloskooppikuva rinnankytkennän toiminnasta, missä CH1 on 26 V:n moduulin jännite ja CH2 on kuorman jännite ja CH4 on virta kuormaan.

Moduulin mahdollisesta vikaantumisesta ilmoittavat ledit, joita käsiteltiin tarkemmin luvussa 5.1.

## 6.2 Lämpötilatesti

Laitteen laajan lämpötila-alueen takia päätettiin moduuleille tehdä lämpötilatesti, jonka tavoitteena oli selvittää DC/DC-moduulin lähtöjännitteen muuttuminen suhteessa ympäristön lämpötilan muutokseen.

Testi suoritettiin Turun AMK:n elektroniikan laboratoriossa. Mittausjärjestely oli seuraava: Ympäristön lämpötilaa muutettiin alueella  $-40\text{ °C} - +70\text{ °C}$  ja mitattiin moduulin lähtöjännite ja lähtösuodattimen jälkeinen jännite kahdella eri kuorman arvolla. Kuormat ovat  $24\text{ }\Omega$  ja  $2,9\text{ }\Omega$ . Lämpötilat mitattiin moduulin pinnasta ja jäähdytyslevyn pinnasta, minkä lisäksi mitattiin uunin sisäilman lämpötila.

Moduulit säädettiin  $12,12\text{ V}$ :n jännitteeseen ulkoisia vastuksia käyttämällä. Muita mittauksessa käytettyjä ulkoisia komponentteja olivat moduulin lisäksi tulokondensaattori ja lähtöpuolella LC-suodatus.

Ympäristön lämpötilan muuttaminen ei juurikaan vaikuttanut moduulien lähtöjännitteisiin käytetyillä kuormilla. Suurin havaittu muutos lähtöjännitteissä oli vain  $0,17\text{ }\%$ , joka on käytännössä merkityksetön ottaen huomioon laajan lämpötila-alueen. Mittauksessa havaittiin myös moduulin hyötysuhteen paraneminen lähtövirran kasvaessa.

## 6.3 Tyypitesti

Ensimmäiselle prototyypille suoritettiin tyypitesti, jossa selvitettiin kattavasti laitteen ominaisuudet ja varmistettiin, että laite toimii kuten oli suunniteltu. Mitattavia asioita olivat mm. lähtöjännitteet ja -virrat, laitteen dynamiikka eli vaste askelmaiseen kuorman vaihteluun, kuormitus/lämpötilatesti ja laitteen toiminta koko tulojännitealueellaan.

Jännitevalvonta testattiin ilman moduuleja. Jännitteet syötettiin moduulien lähtöihin erillisestä jännitelähteestä. Ledien vaihtumisrajat kirjattiin ylös ja moduulien sammutuskytkennän toiminta varmistettiin. Hajonta pysyi suunnitelluissa rajoissa. Suurimmat mitatut hajonnat raja-arvoista olivat  $2\text{ }\%$ .

Jännitevalvonnan testaamisen jälkeen DC/DC-moduulit juotettiin paikoilleen ja aloitettiin ylivirtasuojauksen testaus. Kutakin lähtöä kuormitettiin pienellä kuormalla siten, että moduulin lähtövirta oli hieman suurempi kuin mitoitettu ylivirtaraja. Myös

ylivirtasuojaukset toimivat odotetusti: Ylikuormitettu moduuli sekä 24 V:n moduuli sammuivat. Teholähteen uudelleenkäynnistämisen jälkeen lähdöt toimivat normaalisti.

Seuraavaksi oli vuorossa kuormitustesti. Lähtöjä kuormitettiin 50% ja 100% nimellisestä kuormasta ja seurattiin lähtöjännitteiden muuttumista. Lähtöjännitteet pysyivät annettujen toleranssien sisällä myös 100 %:n kuormalla suurimman jännitteen laskun ollessa lähes 3 %, joka oli annettu toleranssi. Jännitteen laskua olisi todennäköisesti saatu vähennettyä kytkemällä DC/DC-moduulien sense -nastat lähemmäs lähtöliittimiä, jolloin mm. johtimien resistansseista aiheutuvia häviöitä olisi saatu kompensoitua. Laitteen lähtöjen vaste askelmaiseen kuorman vaihteluun testattiin. Kuormaa vaihdettiin kytkimellä siten, että lähtö antoi aluksi 10 % nimellisvirrasta ja kuorman muuttamisen jälkeen n. 90 % nimellisvirrasta, minkä jälkeen kuorma vaihdettiin takasin 10 %:n tasoon. Lähtöjännitteitä tutkittiin mahdollisen värähtelyn ja asettumisajan osalta. Lähdöt asettuivat lähes välittömästi kuorman muuttamisen jälkeen eikä värähtelyä esiintynyt.

Teholähteelle tehtiin myös lämpötilatesti: Laitteen kaikkia lähtöjä kuormitettiin nimelliskuormalla n. 1,5 tunnin ajan. Testi suoritettiin kolmella tulojännitteellä: 14 V, 24 V ja 48V. Piirilevyn, komponenttien ja jäähdytysprofiilin lämpenemistä mitattiin infrapunamittarilla ympäristön lämpötilan ollessa 25 °C. Testin tulokset tukivat tässäkin suunnittelun onnistumista eikä laite lämmennyt liikaa. Teholähteen lämpötila nousi noin 20 °C ympäristön lämpötilaa korkeammaksi. Lämpötila testin aikana varmistettiin myös lähtöjännitteiden pysyminen toleranssien sisällä.

Kaiken kaikkiaan laitteen suunnittelu oli onnistunut hyvin ja asetettujen toleranssien sisällä pysyttiin. Parantamisen varaa olisi ollut DC/DC moduulien sense -nastojen vetojen reitittämisessä. Viemällä nämä vedot lähemmäs lähtöliittimiä olisi lähtöjännitteiden tippuminen kuormituksessa saatu todennäköisesti entistäkin pienemmäksi.

## 6.4 EMC testaus

Teholähteelle säteilevät häiriöt mitattiin Turun AMK:n EMC-laboratoriossa. Testillä haluttiin varmistaa, että laite täyttää EN50155-standardin asettamat vaatimukset säteileville häiriöille. Laite suoriutui testistä hyvin suurimpien häiriöpiikkien jäädessä n. 15 dB:n päähän suurimmasta sallitusta säteilyarvosta.

Säteilevien häiriöiden lisäksi testattiin laitteen suojaus nopeita transientteja sekä ylijännitepiikkiä vastaan. Nopeat transientit olivat kestoltaan 5/50 ns ja ylijännitepiikki 5/50  $\mu$ s. Transienttien tarkempi määrittely löytyy luvusta 3.1. Laite selvisi hyvin myös näistä testeistä eikä laitevaurioita aiheutunut. Tehtyjen testien perusteella voidaan laitteen EMC-suunnittelua pitää onnistuneena.



## 7 Laitteen kehittäminen ja parannusehdotukset rakenteeseen

Vaikka laitteen suunnittelu onnistuikin testien perusteella hyvin, on rakennetta aina mahdollista parantaa. Lähtöjännitteiden toleransseiksi määriteltiin 3 % ja testeissä jännitteen lasku nimellisellä kuormalla oli pahimmillaan lähes toleranssin suuruinen. Jännitteen lasku aiheutui pääasiassa johtimien ja komponenttien häviöistä ja alkoi näkyä vahvemmin suurilla virroilla. Jännitteen laskua pystyttäisiin todennäköisesti pienentämään reitittämällä uudessa piirilevyversiossa DC/DC-moduulien sense-nastat lähemmäksi lähtöliittimiä, jolloin moduulit kompensoisivat jännitehäviön paremmin. Näin lähtöjännitteet pysyisivät kuormitettuinakin lähempänä nimellisarvoaan.

Osa lähdöistä on suhteellisen pienitehoisia verrattuna suurimman tehon antaviin lähtöihin. Kaikki lähdöt on toteutettu saman mallisilla DC/DC-moduuleilla, mistä aiheutuu ylimitoitusta pienempitehoisten lähtöjen kohdalla. Laitteen valmistuskustannuksia saattaisi olla mahdollista pienentää, mikäli pienitehoisiin lähtöihin löytyisi sopivat pienempitehoiset DC/DC-moduulit. Moduulien vaihtaminen ei saisi kuitenkaan heikentää laitteen luotettavuutta. Tulisi varmistaa, että uudet moduulit täyttävät samat ympäristön vaatimukset, kuin vanhatkin moduulit. Lisäksi pitäisi huomioida mahdolliset muutokset suodatuksi liiallisten sähkömagneettisten häiriöiden välttämiseksi. Myös laitteen muita komponenttivalintoja on mahdollista optimoida valmistuskustannusten pienentämiseksi tai luotettavuuden parantamiseksi. Suuremmat tuotantomäärät tuovat omalta osaltaan laitteen kustannuksia alaspäin.

Laitteen käyntilämpötilan laskeminen pidentää sen komponenttien elinikää ja parantaa luotettavuutta. Laitteen lisäjäähdytys saattaisi olla perusteltua komponenttien eliniän pidentymisellä, vaikka teholähde ei käyntykään lämpötesteissä liian kuumana. Koska teholähteen kotelossa on jonkin verran tyhjää tilaa, saataisiin laitteen lämpötilaa alemmas aktiivisella jäähdytyksellä eli sijoittamalla koteloon pieni tuuletin. Ottamalla lämpötestin aikana teholähteestä kuva lämpökameralla saadaan paikannettua levyiltä mahdolliset kuumat pisteet, jotka lämpenevät muuta levyä enemmän. Mikäli näiden pisteiden lähellä on lämpötilalle herkkiä komponentteja kuten elektrolyyttikondensaattoreita, tulisi ne siirtää mahdollisessa seuraavassa piirilevyversiossa kauemmas tai muuten huolehtia kyseisen kohdan jäähdytyksestä. Näin saadaan vähennettyä lämpötilasta aiheutuvia vikoja pitkällä aikavälillä.

## 8 YHTEENVETO

Tässä työssä suunniteltiin monilähtöinen DC/DC-teholähde n. 200 W:n teholle. Työssä painotettiin teholähteen valvontaa ja suojausta. Teholähde suunniteltiin korvaamaan asiakasyrityksen vanha teholähde. Suunnittelun pohjana käytettiin vanhan laitteen spesifikaation lisäksi rautatiestandardia EN50551. Suunnittelun alusta asti pyrittiin huomioimaan sähkömagneettinen yhteensopivuus ja vaativan käyttöympäristön aiheuttamat vaatimukset.

Laitteen jokaiselle lähdölle suunniteltiin yli- ja alijännitesuojaus sekä ylivirtasuojauus, jotka sammuttavat lähdön mahdollisessa vikatilanteessa laitteiden vaurioitumisen estämiseksi. Asiakkaan toiveesta laite ei saa käynnistyä vikatilanteen jälkeen automaattisesti, vaan se vaatii manuaalisen kuittauksen. Tätä varten suunniteltiin 1 bitin muisti, joka pitää lähdön sammuneena, kunnes laite käynnistetään uudestaan. Teholähteeseen suunniteltiin myös värilliset ledit ilmoittamaan laitteen lähtöjen tilasta, mikä nopeuttaa vianmääritystä mahdollisessa vikatilanteessa. Laite suojattiin standardin EN50511 määrittelemiltä transienteilta. EMC huomioitiin suunnittelemalla suodatuksia laitteen tulo- ja lähtöpuolelle sekä suunnittelemalla piirilevy huolellisesti.

Suunnittelun onnistuminen varmistettiin vielä kattavin laboratoriotestein: Turun AMK:n EMC-laboratoriossa mitattiin laitteen EMC-ominaisuudet, minkä lisäksi laitteen suojaukset, kuormitettavuus sekä lähtöjen pysyminen määritellyissä rajoissa testattiin. Laitteen lähtöjännitteet pysyivät annetuissa rajoissa ja suojaukset toimivat odotetusti.

Suunniteltua teholähdettä voidaan käyttää pohjana suunniteltaessa esimerkiksi teholähde vastaavaan sovelluskohteeseen suuremmalle akustojännitteelle. Työtä voisi jatkaa mm. optimoimalla laitteen komponenttivalintoja kustannusten pienentämiseksi. Myös piirilevyn hiominen paremmaksi saattaisi tulla kyseeseen.

## LÄHTEET

- [1] Kasurinen, M., puhelinkeskustelu, 4.11.2010
- [2] *EN50155, Railway applications - Electronic equipment used on rolling stock*, 2006
- [3] Mammano & Carsten, "Understanding and Optimizing Electromagnetic Compatibility in Switchmode Power Supplies", [pdf-dokumentti], saatavilla: <http://focus.ti.com/lit/ml/slup202/slup202.pdf>, (viitattu: 27.11.2010)
- [4] Ozenbaugh, R., L., *EMI Filter Design, Second Edition*, 2000.
- [5] ABB Oy, "ABB:n TTT-käsikirja 2000-07", TK kurssimateriaali
- [6] Kuisma, M., "EMC", [pdf-dokumentti], saatavilla: <https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/.../l4-johtuvat.pdf>, (viitattu: 29.11.2010)
- [7] Niiranen, J., *Tehoelektroniikan komponentit*
- [8] Armstrong, K., "Design Techniques for EMC Part 5 — Printed Circuit Board (PCB) Design and Layout", saatavilla: <http://www.compliance-club.com/pdf/128424618153773750DesignTechPart5%281st%29.PDF>, [pdf-dokumentti], (viitattu: 1.1.2011)
- [9] Huhtinen, V., "lineaariset lähteet", Teholähteet kurssimateriaali
- [10] Clark, M. ja Walters, K., [GIF], saatavilla: <http://www.microsemi.com/micnotes/100ser/103.htm>, (viitattu 27.11.2011)
- [11] Linear Technology, "LTC4357 datasheet", [pdf-dokumentti], saatavilla: <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/4357fd.pdf>, (viitattu: 10.1.2011)